ВЕСЦІ НАЦЫЯНАЛЬНАЙ АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ № 2 2015
СЕРЫЯ ХІМІЧНЫХ НАВУК

ГЕАХІМІЯ

УДК 574::539.1.04+539.16/.17

*Г. А. СОКОЛИК, С. В. ОВСЯННИКОВА, Т. Г. ИВАНОВА, М. В. ПОПЕНЯ,
Е. В. ВОЙНИКОВА*

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ ПОСЛЕ ВНЕСЕНИЯ БИОУГЛЯ

Белорусский государственный университет

(Поступила в редакцию 23.01.2015)

Введение в проблему. Биоуглем называют продукт, получаемый из биомассы различного происхождения (отходов древесины, навоза, соломы, костей и другого органического материала) при нагревании в среде с низким доступом кислорода и температуре не выше 500 °С. При такой обработке (пиролизе) из органического сырья удаляется влага и летучие вещества, образующиеся в процессе частичного разложения целлюлозы и лигнина. В результате масса исходного материала уменьшается, углерод связывается в устойчивые ароматические соединения, а его содержание в пиролизуемой биомассе значительно увеличивается. Фактически биоуголь – это промежуточный продукт между древесиной и древесным углем [1, 2].

Огромный интерес к биоуглю, проявляемый в последние годы во многих странах, вызван тем, что его использование является одним из возможных способов решения продовольственных и некоторых экологических проблем. Благодаря специфическим свойствам биоуголь может применяться для улучшения качества бедных гумусом и питательными веществами почв, что позволяет добиться повышения урожайности сельскохозяйственных культур. Его высокая пористость в совокупности с другими физико-химическими особенностями способствует задержанию в почве влаги и питательных веществ. Биоуголь предотвращает вымывание удобрений, накапливая их в доступных для растений формах, в результате чего можно заметно сократить применение минеральных удобрений. Биоуголь является естественным местом обитания бактерий и микоризы, которые помогают корневой системе растений усваивать питательные вещества. В связи с этим биоуголь считают одним из наиболее перспективных видов удобрения не только потому, что при его внесении в почву хорошо растут и развиваются растения, но и что этот вид удобрения не увеличивает концентрацию углекислого газа в атмосфере. Процесс минерализации биоугля в почве протекает чрезвычайно медленно, что существенно уменьшает скорость возвращения в атмосферу содержащегося в нем углерода в виде углекислого газа [1–5].

Кроме того, применение биоугля помогает облегчить утилизацию органических отходов и создать новые способы выработки экологически чистой энергии. Уже разработаны технологии пиролизной переработки и превращения в биоуголь органических отходов сельского хозяйства, пищевой, лесной и деревообрабатывающей промышленности, предложен даже способ переработки и превращения в биоуголь осадков сточных вод. При этом производство биоугля требует минимальных энергетических затрат, поскольку газообразные и жидкие продукты пиролизной обработки биомассы могут использоваться в качестве дополнительного энергоресурса для поддержания необходимой температуры [1, 2].

В настоящее время во многих странах мира осуществляются проекты по изучению различных эффектов внесения биоугля в почву [3, 4, 6–8]. Вместе с тем до сих пор не ясно, в каких

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

дозах следует вносить биоуголь в конкретные виды почв. Разным почвам для сохранения плодородия требуется различное соотношение стабильных и относительно легко разлагаемых органических соединений углерода. Использование слишком больших доз биоугля может не только не повысить, но даже снизить плодородие некоторых почв. Отсутствует также и достоверная информация о том, как под действием биоугля изменяется физико-химическое состояние, миграционная способность и биологическая доступность присутствующих в почве радионуклидов и тяжелых металлов.

Настоящая работа посвящена изучению влияния биоугля на физико-химические характеристики почв, определяющие состояние, подвижность и доступность растениям биогенных макроэлементов, таких как калий и кальций, а также тяжелых металлов, в том числе кадмия, свинца и урана естественного и антропогенного происхождения. В Республике Беларусь подобные исследования проведены впервые.

В процессе исследования были изучены: влияние биоугля на содержание кадмия, свинца и урана в почве в области корневого питания сельскохозяйственных растений; характер изменения после внесения биоугля почвенных характеристик, от которых зависят подвижность и доступность растениям калия, кальция и тяжелых металлов, таких как кадмий, свинец и уран.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования являлись образцы широко распространенных на территории Республики Беларусь песчаных и супесчаных разновидностей почв дерново-подзолистого типа и биоуголь отечественного производства из отходов древесины дуба, ясеня, граба и березы. Перед внесением в почвы биоуголь измельчался на шаровой мельнице до порошкообразного состояния.

Образцы (0–20)-см слоев почв, условно соответствующие области корневого питания сельскохозяйственных растений [9], были отобраны методом конверта с помощью металлического бура в 2012 г. в Браславском районе Витебской области. Отобранные образцы были перемешаны, высушены до воздушно-сухого состояния при температуре (35±3) °С и просеяны через сито с диаметром отверстий 2 мм.

Общее содержание в образцах органических компонентов (ОК), полную влагоемкость (ПВ), актуальную (pH_{H2O}) и потенциальную ионообменную кислотность среды (pH_{KCl}) определяли по стандартным методикам [10]. Содержание в почвах калия и кальция в обменной форме устанавливали по результатам экстрагирования в течение суток элементов из почвенных проб раствором ацетата аммония (1 моль/дм^3) при pH, соответствующих pH_{KCl} почвенной среды, а в подвижной форме – раствором ацетатного буфера (pH 4,6) при соотношении компонентов почва: раствор 1:10. Содержание Cd, Pb, K и Ca в анализируемых пробах определяли с помощью атомно-адсорбционного спектрометра ZEEnit 700. Для перевода исследуемого вещества в атомно-дисперсное состояние использовали пламя смеси ацетилен–воздух. Общее содержание урана в образцах оценивали по величине их удельных активностей по ^{234}U и ^{238}U, установленных посредством радиохимического анализа не менее 4 параллельных проб с альфа-спектрометрической идентификацией радионуклидов спектрометром SOLOIST U0450 фирмы EG&G ORTEC, оснащенным детекторами 576 А-600 RV [11].

Исследовали динамику изменения характеристик почвенных образцов после внесения биоугля в дозах 1, 3 и 5 мас.% в расчете на абсолютно сухое вещество. Эксперименты проводили в лабораторных условиях с образцами почв, содержащими природный уран, которые были искусственно обогащены кадмием до уровня ~ 4,8 мг/кг и свинцом до уровня ~ 120 мг/кг. После добавления тяжелых металлов (Cd и Pb) почвенные образцы тщательно перемешивали и выдерживали в течение месяца при температуре (18 ± 2) °С и влажности (70 ± 5)% от массы абсолютно сухой почвы. Через месяц в исследуемые почвы вносили различные дозы биоугля. Образцы почвы с добавками биоугля и контрольные образцы почвы, в которые не вносили биоуголь, выдерживали при тех же условиях в течение заданного времени (от 1 до 6 месяцев). Влажность почвенных образцов контролировали по их массе, в случае необходимости почвенные образцы дополнительно увлажнялись. Все эксперименты с почвенными образцами с биоуглем и контрольными образцами без биоугля двукратно повторялись.

Характеристики исходных образцов почв и биоугля. Установленные характеристики почвенных образцов и биоугля приведены в табл. 1 и 2.

Т а б л и ц а 1. **Характеристики почвенных образцов**

Почва	ОК, %	$ПВ_П$, %	pH_{KCl}	pH_{H_2O}	[Cd], мг/кг	[Pb], мг/кг	A_U, Бк/кг
ДПСп	3,47±0,24	40,2±1,1	5,79±0,10	6,25±0,02	0,37±0,04	5,94±0,30	11,50±0,40
ДПП	2,00±0,18	36,6±1,5	4,63±0,02	5,72±0,08	0,32±0,04	2,94±0,22	8,86±0,16

П р и м е ч а н и е. ОК – общее содержание органических компонентов в анализируемых образцах, % от массы абсолютно сухого вещества. ПВ – полная влагоемкость образца, % от массы абсолютно сухого вещества. pH_{KCl} и pH_{H_2O} – pH суспензии анализируемого образца в растворе 1 моль/дм^3 KCl и дистиллированной воде. [Cd] и [Pb] – общее содержание Cd и Pb в анализируемых образцах в расчете на абсолютно сухое вещество.

Т а б л и ц а 2. **Характеристики биоугля**

ОК, %	ПВ, %	pH_{KCl}	pH_{H_2O}	[Cd], мг/кг	[Pb], мг/кг	[Ca], мг/кг	[K], мг/кг	A_U, Бк/кг
97,4±0,6	305±7	8,50±0,05	8,84±0,05	0,095±0,001	0,286±0,003	2 830±90	2 851±34	0,17±0,03

П р и м е ч а н и е. [Ca] и [K] – общее содержание Ca и K в биоугле в расчете на абсолютно сухое вещество.

Согласно гигиеническим нормативам, действующим в Республике Беларусь, предельно допустимая концентрация (ПДК) свинца в почвах сельскохозяйственного назначения составляет 32 мг/кг абсолютно сухого вещества [12]. При этом его содержание в подвижной форме не должно превышать 6 мг/кг почвы [13]. Ориентировочно допустимая концентрация (ОДК) кадмия для песчаных и супесчаных почв составляет 0,5 мг/кг, такой же уровень ПДК подвижного кадмия для любых почв сельскохозяйственного назначения [14].

Как видно из данных, приведенных в табл. 1, общее содержание кадмия и свинца в исходных образцах почв ниже гигиенических нормативов Республики Беларусь. Показатели, приведенные в табл. 2, свидетельствуют, что биоуголь отличается щелочной реакцией, высокой влагоемкостью (в ~8 раз превышающей влагоемкость почвенных образцов), высоким содержанием калия и кальция, а также низким содержанием кадмия, свинца и урана. Из данных по содержанию кадмия, свинца и урана в исходных образцах почв и биоугле следует, что при дозах внесения биоугля 1–5 мас.% общее содержание этих элементов в почвенных образцах после добавок биоугля увеличивалось незначительно.

Изменение характеристик почвенных образцов после внесения биоугля. При выращивании культурных растений важную роль играет кислотность почвенной среды. За редким исключением культурные растения не растут или дают чрезвычайно низкие урожаи на кислых или щелочных почвах. Многим из них для нормального развития требуется нейтральная или слабокислая почвенная среда. Смещение реакции почвы в более кислую или щелочную сторону угнетает растения. Среди почв, используемых под сельскохозяйственные культуры, много кислых, ненасыщенных основаниями и, следовательно, низкоплодородных. Кроме ненасыщенности основаниями низкое плодородие кислых почв связано также с неблагоприятным влиянием кислой среды на физиологические процессы в растениях и сильной токсичностью обменного алюминия и некоторых микроорганизмов при $pH < 4,5$ [15].

Изменение кислотности почвенной среды под влиянием биоугля в различные сроки после его внесения контролировали по показателям pH_{KCl} и pH_{H_2O}. Динамика изменения этих показателей после внесения биоугля в образцы дерново-подзолистой супесчаной почвы по сравнению с контрольными образцами без биоуголя, показана на рис. 1, *а*, *б*. Как видно из приведенных данных, внесение биоугля в дерново-подзолистую супесчаную почву оказало заметное влияние на кислотность почвенной среды. Через месяц после внесения биоугля в образцы почвы показатель pH_{KCl} увеличился от 6,5 в контрольных образцах до 6,7 при дозе 1 мас.%, 6,8 при дозе 3 мас.% и 7,1 при дозе 5 мас.%.

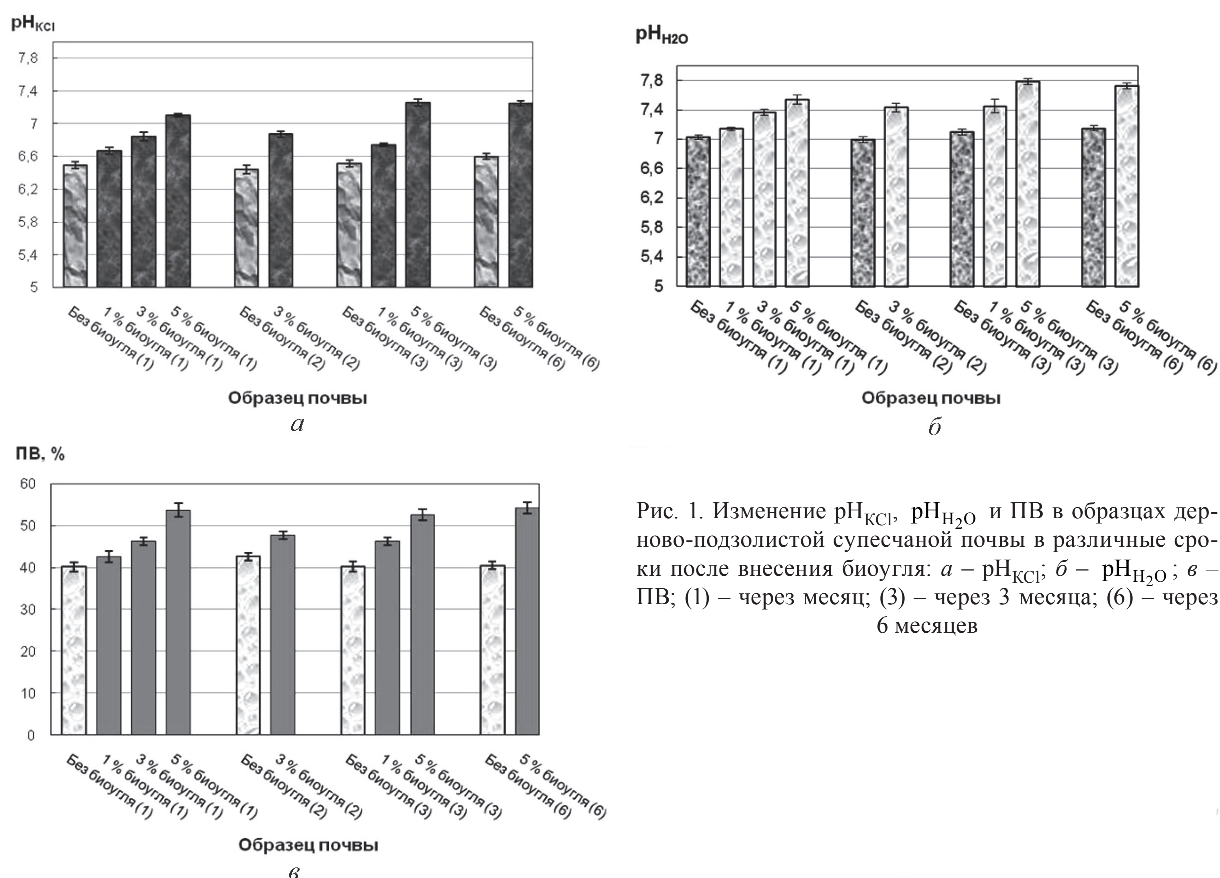


Рис. 1. Изменение pH_{KCl}, pH_{H_2O} и ПВ в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы в различные сроки после внесения биоугля: *а* – pH_{KCl}; *б* – pH_{H_2O}; *в* – ПВ; (1) – через месяц; (3) – через 3 месяца; (6) – через 6 месяцев

Через 2 месяца после внесения 3 мас.% биоугля в почву показатель pH_{KCl} практически не изменился по сравнению с соответствующим показателем почвы, выдержанной с биоуглем в течение месяца. Он остался на прежнем уровне и через 3 месяца после внесения в почву 1 мас.% биоугля, однако при дозе 5 мас.% показатель pH_{KCl} увеличился до 7,3, сохранившись на этом уровне еще через 3 месяца.

Показатель pH_{H_2O}, характеризующий актуальную ионообменную кислотность почвенной среды, вырос по сравнению с контролем при всех дозах биоугля уже через месяц после его внесения в почву. При дозе биоугля 1 мас.% pH_{KCl} достиг уровня 7,1, при дозе 3 мас.% – 7,4 и при дозе 5 мас.% – 7,5. Еще через месяц в почве с 3 мас.% биоугля показатель pH_{H_2O} практически не изменился. Он остался на прежнем уровне и в почве с 1 мас.% биоугля через 3 месяца после его внесения. Наиболее заметно по сравнению с контролем показатель pH_{H_2O} увеличился через 3 месяца после внесения в почву 5 мас.% биоугля, когда он достиг уровня 7,8 и сохранился без изменения еще через 3 месяца.

При выращивании культурных растений, помимо кислотности среды, важную роль играет влагоемкость почвы. Культурные растения по сравнению с природными потребляют много воды, при этом они хуже регулируют ее испарение и транспирацию в условиях дефицита влаги. Чтобы удовлетворять потребность культурных растений в воде, почва должна хорошо впитывать и удерживать влагу [15]. Способность почвы удерживать воду оценивается по величине полной почвенной влагоемкости (ПВ) – максимальному количеству влаги, удерживаемой почвой за счет сил взаимодействия молекул воды с поверхностью почвенных частиц. Обычно ПВ выражается в процентах относительно массы твердого субстрата (твердой фазы) почвы.

Характер изменения ПВ после внесения различных доз биоугля в образцы дерново-подзолистой супесчаной почвы показан на рис. 1, *в*. Как видно из рисунка, внесение биоугля привело к увеличению ПВ супесчаной почвы. Уже через месяц после внесения 5 мас.% биоугля в почвенные образцы ПВ достигла 53–54% от массы твердого субстрата почвы, что на 30% больше, по сравнению с влагоемкостью контрольной почвы без биоугля (ПВ – 40%). Через 3 и даже

6 месяцев после добавления 5 мас.% биоугля влагоемкость почвы практически не изменилась. При дозах биоугля 1 и 3 мас.% в течение всего периода наблюдения увеличение влагоемкости не превышало 15%, причем в почве с дозой 1 мас.% увеличение было отмечено лишь через 3 месяца после внесения биоугля.

Добавки биоугля способствовали и увеличению концентрации в почве подвижного калия (рис. 2, *а*). Наиболее заметно концентрация подвижного калия изменилась при дозе биоугля 5 мас.%: через месяц она увеличилась на 78%, а через 3 месяца – на 87% по сравнению с контролем. Еще через 3 месяца концентрация подвижного калия оставалась на 70% выше, чем в контрольной почве. При дозе биоугля 1 мас.% концентрация подвижного калия в супесчаной почве выросла не более чем на 19%.

В отличие от калия добавка биоугля не оказала существенного влияния на содержание в почве подвижного кальция (рис. 2, *б*). Максимальное изменение концентрации подвижного кальция (увеличение на 18%) наблюдалось через три месяца после внесения 5 мас.% биоугля.

Из результатов выполненного исследования по влиянию различных доз биоугля на характеристики супесчаной почвы следует, что внесение 1 мас.% биоугля оказало относительно слабое влияние на агрохимические показатели почвы, а добавление 5 мас.% приводило к смещению показателей pH_{KCl} и pH_{H_2O} в щелочную область до 7,3 и 7,8 соответственно. Как уже отмечалось,

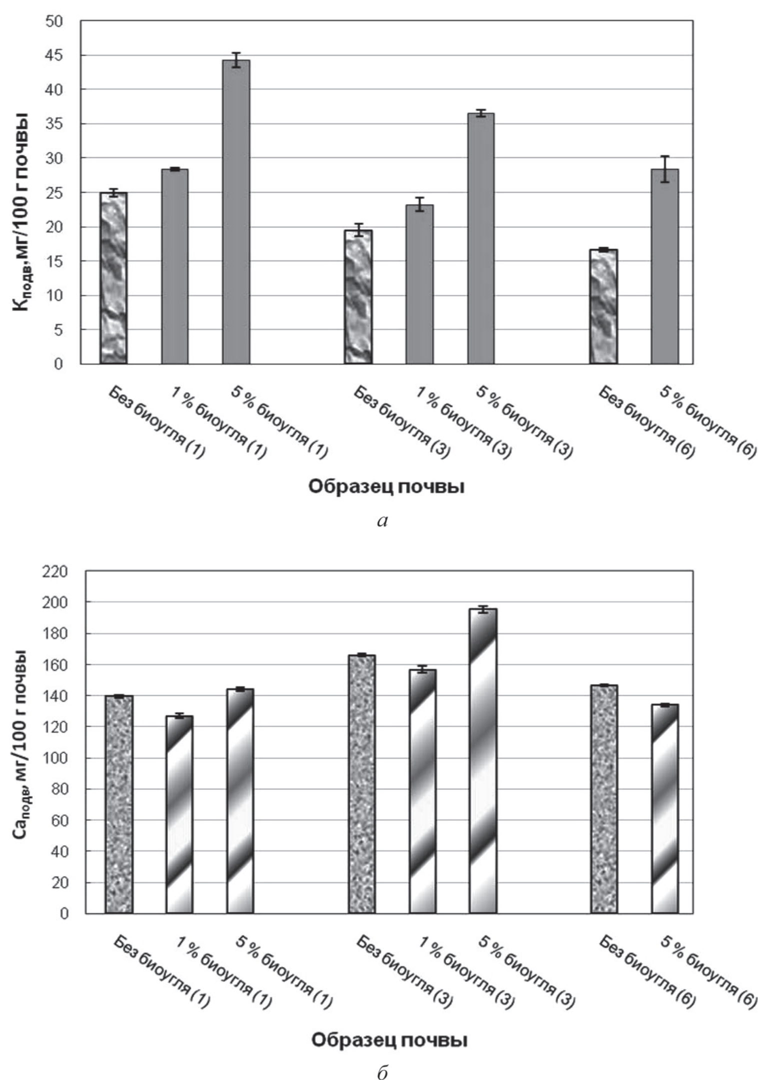


Рис. 2. Изменение концентрации подвижных калия ($К_{подв}$) и кальция ($Са_{подв}$) в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы в различные сроки после внесения биоугля: *а* – $К_{подв}$; *б* – $Са_{подв}$; (1) – через месяц; (3) – через 3 месяца; (6) – через 6 месяцев

подобное смещение может неблагоприятно сказываться на развитии сельскохозяйственных растений. Для сопоставления влияния биоугля на характеристики песчаной и супесчаной разновидностей почв дерново-подзолистого типа была выбрана промежуточная доза биоугля – 3 мас.%.

Об изменении концентраций обменных калия и кальция в образцах песчаной и супесчаной почв после добавления 3 мас.% биоугля можно судить по результатам исследования, представленным на рис. 3, *а*, *б*. По содержанию калия и кальция в обменной форме образцы супесчаной почвы значительно превосходили образцы песчаной. Влияние биоугля на содержание обменного калия более ярко проявилось в песчаной почве. Через месяц после добавления биоугля концентрация обменного калия в песчаной почве увеличилась в 3,3 раза по сравнению с контролем, тогда как в супесчаной почве – в 1,3 раза (на 30%). Через 2 месяца после добавления биоугля концентрация обменного калия в песчаной почве была в 2,7 раза, а в супесчаной почве – в 1,5 раза (на 50%) выше, чем в контрольных образцах.

Концентрация обменного кальция после внесения биоугля в супесчаную почву существенно не изменилась: через месяц она уменьшилась на ~5%, а через 2 месяца увеличилась на 7% по сравнению с контролем. В случае обменного кальция эффект от внесения биоугля в песчаную почву более ярко выражен. Через месяц после внесения биоугля концентрация обменного кальция в песчаной почве увеличилась в 1,5 раза (на 50%), а еще через месяц – в 2,2 раза. Поскольку содержание обменного кальция непосредственно связано с кислотностью почвенной среды, различия между характером изменения содержания обменного кальция в почвах могут быть об-

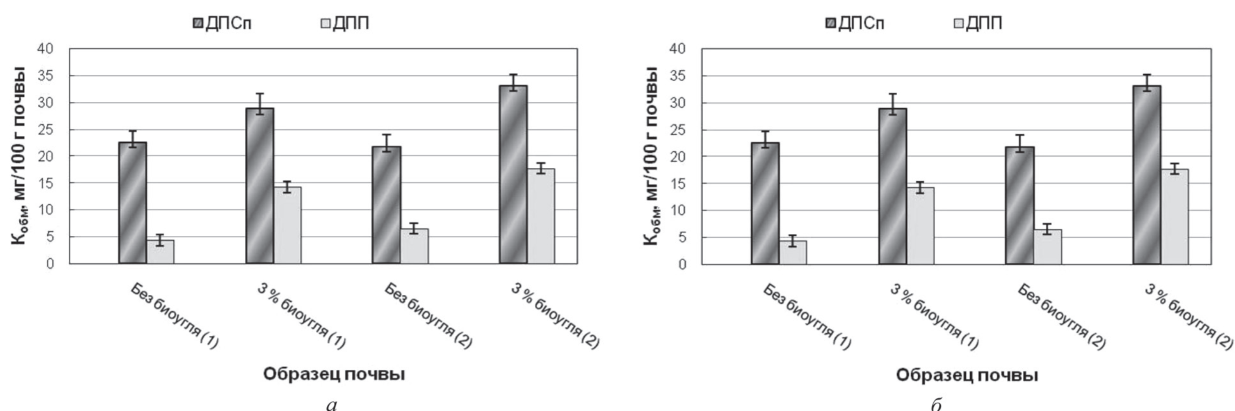


Рис. 3. Изменение концентрации обменных калия ($K_{обм}$) и кальция ($Ca_{обм}$) в образцах дерново-подзолистой супесчаной (ДПСп) и песчаной (ДПП) почв в различные сроки после внесения биоугля: *а* – $K_{обм}$; *б* – $Ca_{обм}$; (1) – через месяц; (2) – через 2 месяца

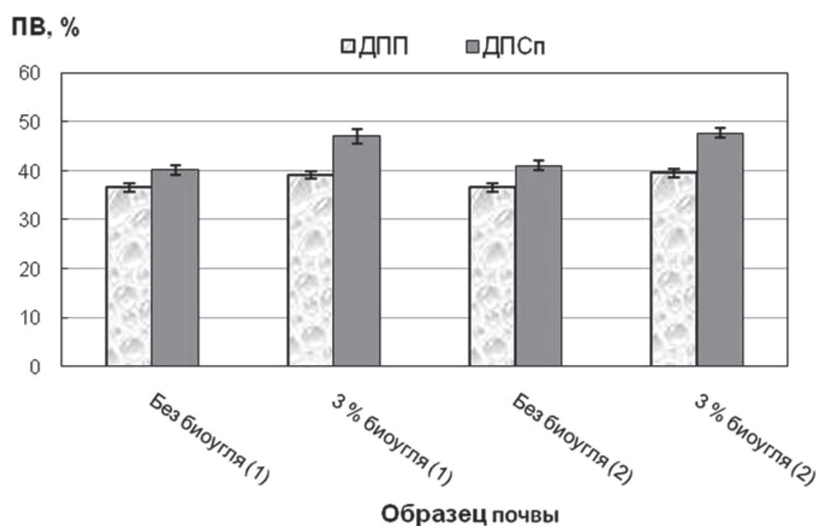


Рис. 4. Сравнительный анализ изменения полной влагоемкости образцов песчаной (ДПП) и супесчаной (ДПСп) почв в результате внесения биоугля; (1) – через месяц; (2) – через 2 месяца после внесения биоугля

условлены более значительным изменением кислотности среды в песчаной почве. Через месяц после внесения биоугля pH_{KCl} песчаной почвы увеличился от 5,0 в контрольном образце до 5,7, а супесчаной почвы – от 6,5 до 6,8. Еще через месяц pH_{KCl} как песчаной, так и супесчаной почвы практически не изменился.

Об изменении ПВ образцов песчаной и супесчаной почв после внесения 3 мас.% биоугля можно судить по результатам исследования, представленным на рис. 4. Так, через месяц после внесения биоугля влагоемкость супесчаной почвы увеличилась по сравнению с контролем на 17% и достигла 47% от массы твердого субстрата почвы, а влагоемкость песчаной почвы повысилась всего на 7% и достигла 39%. Через 2 месяца выдерживания с биоуглем влагоемкость почвенных образцов практически не изменилась.

Заключение. В результате проведенных исследований изучено влияние различных доз биоугля на характеристики песчаных и супесчаных разновидностей почв дерново-подзолистого типа, определяющие состояние, подвижность и доступность растениям элементов питания, таких как калий и кальций, а также тяжелых металлов, включая кадмий, свинец и уран, естественного и антропогенного происхождения.

Установлено, что благодаря низкому содержанию кадмия, свинца и урана в биоугле его внесение в почвенные образцы в дозах до 5 мас.% практически не повлияло на содержание этих тяжелых металлов в почвах.

Показано, что биоуголь может улучшать агрохимические показатели почв с повышенной кислотностью. Добавки биоугля в образцы песчаной и супесчаной почв в дозах 1–5 мас.% снижали кислотность почвенной среды, увеличивали влагоемкость и содержание обменного и подвижного калия. Меньше всего на характеристики почв повлияло внесение 1 мас.% биоугля, более существенно – внесение 3 и 5 мас.%. При этом более заметное снижение кислотности среды и увеличение концентрации обменного калия характерно для более кислой песчаной почвы, тогда как ее влагоемкость после добавок биоугля увеличивалась в меньшей степени по сравнению с супесчаной почвой.

Таким образом, результаты выполненных исследований свидетельствуют о возможности использования биоугля в качестве мелиорирующей добавки к почве. Дозы его внесения существенно зависят от характеристик почвы. Так, в изученной супесчаной почве более благоприятные условия для выращивания сельскохозяйственных растений формируются при дозах внесения биоугля 3 мас.%, тогда как для песчаной почвы более предпочтительна доза 5 мас.%.

Литература

1. *Libra J. A., Ro K. S., Kammann C. et al.* // Biofuels. 2011. Vol. 2(1). P. 89–124.

2. Biochar for environmental management: science and technology / J. Lehmann and S. Joseph (Eds). London (UK): Earthscan, 2009.

3. *Павлов В. М., Саубанов Р. Р., Исрафилов И. Х.* // Социально-экономические и технические системы: Исследование, проектирование, оптимизация. 2012. С. 41–46.

4. *Xua G., Weia L. L., Suna J. N. et al.* // Ecological Engineering. 2013. Vol. 52. P. 119–124.

5. *LeCroya C., Masiello C. A., Rudgers J. A. et al.* // Soil Biology and Biochemistry. 2013. Vol. 58. P. 248–254.

6. *Sparrevik M., Field J. L., Martinsen V. et al.* // Environ. Sci. Technol. 2013. Vol. 47 (3). P. 1206–1215.

7. *Lasharia M.S., Liu Y., Li L. et al.* // Field Crops Research. 2013. Vol. 144. P. 113–118.

8. *Woolf D., Amonette J. E., Sreet-Perrott F. A. et al.* // Nature Communications, 2010. Vol. 1. Article number: 56: doi:10.1038/ncomms1053.

9. IAEA-TCDOC-16162009. Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments. Vienna: IAEA, 2009.

10. Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006.

11. МВИ. МН 1497-2001. Методики определения урана в почвах и аэрозольных фильтрах. Минск: БелГИМ, 2001.

12. Нормативы предельно допустимых концентраций подвижных форм никеля, меди и валового содержания свинца в землях (включая почвы), расположенных в границах населенных пунктов, для различных видов территориальных зон по преимущественному функциональному использованию территорий населенных пунктов. Минск: Минздрав РБ, 2009.

13. Перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы 2.1.7.12-1-2004. Минск: Минздрав РБ, 2004.

14. Предельно допустимые концентрации (ПДК) подвижных форм хрома, цинка, кадмия в почвах (землях) различных функциональных зон населенных пунктов, промышленности, транспорта, связи, энергетики, обороны и иного назначения. Минск: Минздрав РБ, 2008.
15. Почвоведение / Под ред. В. А. Ковды, Б. Г. Розанова / Ч. 1. Почва и почвообразование / Г. Д. Белицына, В. Д. Василевская, Л. А. Гришина и др. М.: Высшая школа, 1988. С. 199.

G. A. SOKOLIK, S. V. OVSIANNIKOVA, T. G. IVANOVA, M. V. PAPENIA, K. V. VOINIKAVA

CHARACTERISTICS OF SOD PODZOL SOILS AFTER BIOCHAR APPLICATION

Summary

The effect of biochar implementation into sandy and loamy-sand sod podzol soils on the soil acidity, total water capacity and concentration of exchangeable and mobile potassium and calcium has been investigated. It has been found that the biochar application caused the decrease in the soil acidity and also increases of the water capacity and concentrations of exchangeable and mobile potassium in sandy and sandy loam soils. The favorable conditions for growing agricultural plants in sandy-loam soil could be created with application of 3 w. % of biochar, but in sandy soils it can be reached with 5 w. % of biochar.